

立体画像での視覚疲労の要因

矢野 澄男

島根大学 大学院総合理工学研究科
〒 690-8504 島根県松江市西津町 1060

1. はじめに

立体画像が映画、放送、ゲームなどで、よく利用されてきている。特に、映画産業では、映像のデジタル化に伴う立体映像サービスが、現状、一定の位置にあると思われ、同時に、これは、一つには家庭で、大画面化、高精細化が進む放送サービスへの対案のように思われる。一方、放送では、フラットパネルディスプレイの高フレームレート化と大容量の記憶装置の普及を前提とした一つの応用と思われる。ただ、映像サービスとしては、放送、ゲーム産業に比べて映画産業が先んじていると見える。

このように、実用化が進む立体画像は、左右両眼に対応する2枚の画像から奥行き情報を得る方法であり、決して新しい映像表示方法ではないが、実用化を考えると、これまでには十分検討されていなかった項目が多々ある。加えて、現時点でも、コンテンツ制作を考慮すると未踏の部分が多い¹⁾。本稿では、この中で、特に、立体画像の特徴である視覚疲労に関して概説を行う。なお、立体画像の特徴、例えば、表示画像の歪など、あるいは立体ディスプレイ、および、3次元ディスプレイの装置としての研究開発の現状は他の文献を参考にしていただければと思う²⁾。

2. 立体画像と立体視

奥行き方向に、視対象を観視する場合の眼球

2012年冬季大会シンポジウム講演
本研究はNHK放送技術研究所、および、ATR人間情報科学研究所で行ったものである。

運動と調節機能の基本的な振る舞いは Donders' line によって示される³⁾。Donders' line では、輻輳運動による視点位置と調節機能によるピント調節点は一致することが示されている。しかしながら、両眼単一視可能な範囲は、これらの視点位置とピント調節点が、必ずしも一致する必要がないことも示されており、視点位置を固定した場合、ピント調節点が機能する範囲は許容範囲があり、逆に、ピント調節点を固定した場合にも、視点位置には許容範囲がある。これらの限界は受容される視対象のボケによって規定されている。このため、Donders' line で示されるすべての範囲が快適に観視可能ではなく、Percival の快適視域という範囲が提案されている⁴⁾。この範囲は、視距離 33 cm より奥方向、Donders' line で示される最大の両眼単一視の範囲のそれぞれの 1/3 として規定されている。

一方、このような特性を有する眼球運動・調節機能系の単純化したモデルは図1で示される。同図に示すように、眼球運動系と調節機能系には、クロスリンクがある。また、調節機能系には、焦点深度にかかわる特性があり、視対象が焦点深度内にあると、調節機能系の振る舞いよりは、クロスリンクによる輻輳運動系の影響を

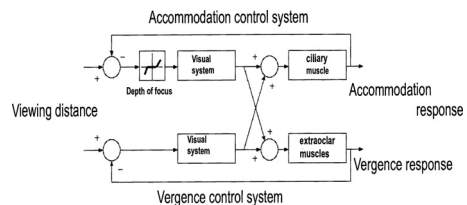


図1 眼球運動・調節機能の単純化したモデル。

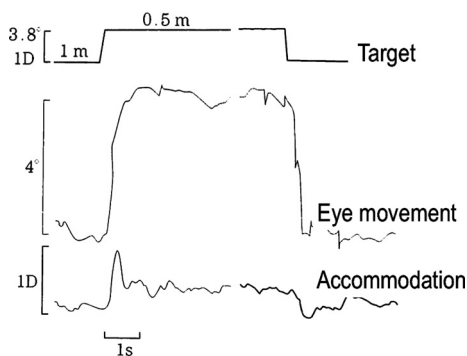


図2 立体視標に対する眼球運動・調節応答.

強く受けることが、同図から理解される。

ところで、立体画像の表示を考えると、左右両眼に対応する画像を表示装置のスクリーン上に表示し、観視者はその視点位置から両眼融合範囲にある視対象を受容し、奥行き情報を得ることになる。この場合、例えばスクリーンから大きく離れ、手前、あるいは、奥に画像が表示された場合は、輻輳運動による両眼融合を余儀なくされ、視点位置は、スクリーンから大きく離れる。この場合、視点位置から離れた位置にあり、左右網膜像に差がある視標に関しては、その網膜像の差が両眼融合範囲であれば、奥行き知覚が成立するが、本稿では、この網膜像の差が、近似的に0と見なされる場合、すなわち、表示画像が表示画面から前または後に一定の奥行きで表示されるような両眼視差が一定の画像も立体画像と称する。

一方、立体画像を視対象として、輻輳・調節機能を測定した例として、図2の結果がよく知られている⁵⁾。同図によると、奥行き方向に視標を表示した場合、輻輳運動は視標の動きに追従し、変化するが、調節機能は、追従する過渡応答は示すものの、その後、ある一定レベルに留まり、視標に対する輻輳運動のように振舞わない。すなわち、立体画像では、実際の視対象を見る場合と異なり、視標の奥行き運動に伴い、眼球の輻輳運動が行われ、奥行き情報を得るが、ピント調節は、表示画面の視標に働くために、ピント調節は表示画面そのもの位置に

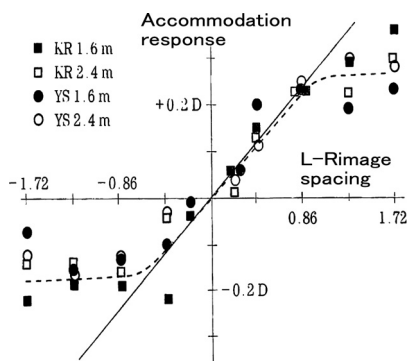


図3 焦点深度内の立体視標に対する眼球運動・調節応答.

機能する。このため、視差が大きい場合は、輻輳と調節が競合することになり、視覚疲労が生じると推測されている。しかしながら、ピント調節機能には焦点深度があり、この範囲であれば、輻輳運動で決まる輻輳点にピント調節位置は一致する。この結果は、図3によって示されており、この場合、輻輳位置とピント調節位置は一致する⁶⁾。すなわち、輻輳と調節の競合はなく視覚疲労は生じないと推測される。

3. 立体画像での視覚疲労

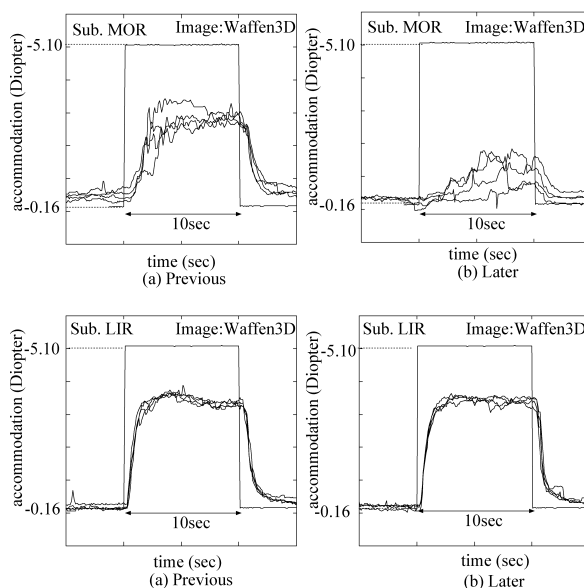
3.1 立体画像コンテンツによる視覚疲労

試行的に制作された立体画像を用いて、立体画像の観視に伴う視覚疲労について、実験的な検討を行った⁷⁻¹¹⁾。視覚疲労の検討に際しては、

- (1) 視覚疲労の程度を比べるべき基準の画像
- (2) 観視時間、特に休憩の有無
- (3) 観視者の画像を観視の確認
- (4) 視覚疲労の評価基準

などの項目について考慮する必要がある。これらを考慮したうえで、検討に際しては、表示サイズとして120インチ、視距離4.5mでの立体/2次元HDTV画像提示装置を使用し、実験を行った⁸⁾。視覚疲労の検討に際しては、観視時間は休憩を含めて約1時間とし、被験者は観視中、画像の見やすさを、単一刺激連続評価法により提示される立体/2次元HDTV画像に関して評価することとした。また、視覚疲労に関

(1)Waffen 「3D」 観視 1 時間前後の調節応答



(2)Africa 「3D」 観視 1 時間前後の調節応答

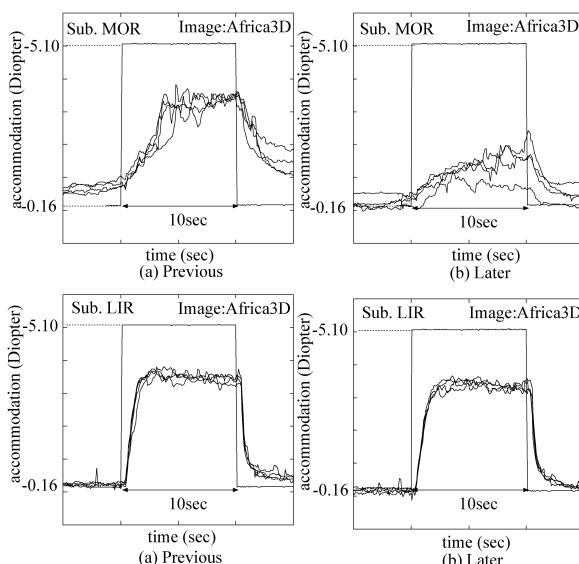


図 4 立体 HDTV を観視 1 時間前後での調節応答. (1) Waffen 「3D」 観視 1 時間前後の調節応答, (2) Africa 「3D」 観視 1 時間前後の調節応答.

しては、主観評価を基本とし、客観的な評価として、立体/2次元 HDTV 画像の観視前後で、調節機能の変動を測定することとした。

提示した画像は、立体 HDTV のコンテンツ「Waffen (時間：15分)」と「Africa (仮称, 時間：10分)」である。これらの画像は、一般へ

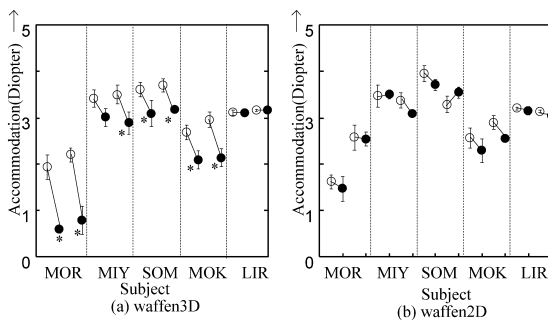
の公開を目的として制作され、前者はNHK、後者は外部プロダクションによって、立体 HDTV コンテンツとして、制作された。2つの画像の最も大きな違いは、「Waffen」は、通常の HDTV カメラ2台に輻輳を付加したり、あるいは、並列にセットし撮影しており、「Africa」では、カ

メラ間隔 65mm の平行セットされたカメラにより撮像している点である。

休憩を含めて、複数回繰り返して約 1 時間提示した観視前後の調節応答の結果を示す。図 4 (1) が立体 HDTV のコンテンツ「Waffen」に体する結果であり、図 4 (2) が同様に「Africa」に対する調節応答の結果であり、いずれの場合も 2 名の被験者の測定結果を例示している。また、2 つの結果を示す図において (a) が観視前で、(b) が観視後である。これらの結果の図では、4 回の測定結果を重畳表示している。なお、図中の矩形波が測定に用いた内部視標である。内部視標は、雲霧状態から、 -0.16 Diopter (以後、D と略す) の位置に 10s 間表示し、 -5.10 D に 10s 間表示し、さらに、 -0.16 D に 10s 間表示されるように制御した。これらの波形から、わかるように、被験者によって、立体 HDTV を観視することにより、視覚疲労が生じる場合もあり、生じない場合もあることが推測される。

次に、図 5 (1) に、(a) 立体 HDTV と (b) HDTV 「Waffen」を観視した場合の観視前後での調節応答の振幅の差を示す。横軸には被験者 5 名をとり、縦軸を振幅差の値としている。それぞれの被験者に関して、2 回の試行の結果を示す。図 5 (2) には、同様に (a) 立体 HDTV と (b) HDTV で、「Africa」を観視した場合の結果を示す。なお、これらの図中に、観視前後で調節応答波形の振幅差が、 0.5 D 以上の場合には「*」を施している。これらの結果から、HDTV に対して 1 時間の観視前後での調節応答の振幅差を求めると、大きな差は認めることができなかった。一方、HDTV 立体画像では被験者 5 人で、「Waffen」では 3 人、「Africa」では 2 人に、調節応答の振幅差の点では、視覚疲労が推測されるとの結果となった。したがって、立体 HDTV 画像の観視の場合には、2 次元 HDTV 画像に比較して、明らかに、すべての観視者ではないが、視覚疲労が生じる可能性がある観視者

(1)Waffen 「3D」「2D」観視 1 時間前後の調節応答の振幅変動



(2)Africa 「3D」「2D」観視 1 時間前後の調節応答の振幅変動

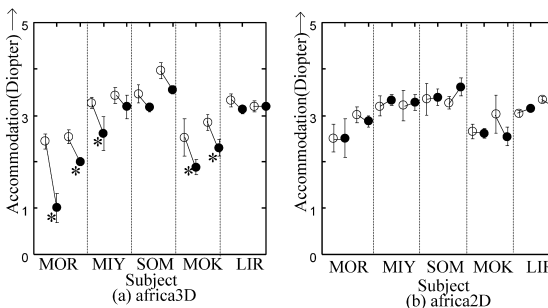


図 5 立体／平面 HDTV を観視 1 時間前後での調節応答の振幅変動。(1) Waffen 「3D」「2D」観視 1 時間前後の調節応答の振幅変動、(2) Africa 「3D」「2D」観視 1 時間前後の調節応答の振幅変動。

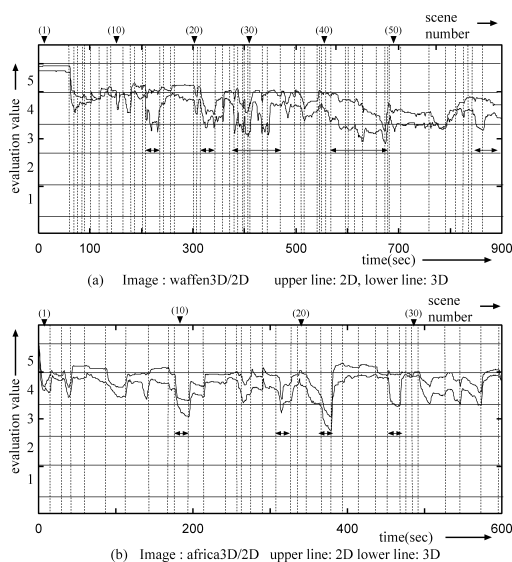


図6 「Waffen」「Africa」に対するSSCQEの結果。

がいるといえる。

しかしながら、同時に、新たな疑問も生じてくる。すなわち、この場合、画像に対する視距離は、4.5mである。これは、約2.4mから45mが焦点深度内に計算上は設定される。つまり、この範囲では、これまでの実験結果から、輻射・調節の競合はなく、今回の画像でも、ほとんどの表示がこの条件を満足すると思われる。したがって、視覚疲労の観視者がいたが、その原因は、輻射・調節の競合以外にも求めざるを得なくなる。

上述した結果を考慮しながら、単一刺激連続評価法 (SSCQE) による「見やすさ」の結果を吟味した⁹⁾。「見やすさ」を評価した結果である単一刺激連続法による評価結果を図5および図6に示す。図5(a)が「Waffen」、同図(b)が、「Africa」に対する結果である。図の横軸が時間を示し、かつ、縦点線がシーンチェンジを示している。「Waffen」は約15分であり、「Africa」は10分である。縦軸は主観評価値である。これらの図に示す結果で、結果が良い方が、HDTV画像に関する結果であり、結果が良くない、つまり、下側の線が立体HDTV画像に関する結果である。さらに、平面画像と立体画像の

評価が大きく、異なる場合に関して、図中に両端矢印により、明示した。すべてのケースで、立体画像の評価が平面画像の評価より大きく低い場合である。

次に、これら両端が矢印で示したシーンに関して、左右画像の相関、つまり、ほぼ両眼視差に相当、および、立体画像での左眼に対応する画像での動きベクトルの量との関係を図7および図8に示す。図7が、「Waffen」の場合である。シーンとしては、同図において(1)14から18カット、(2)20から24カット、(3)25から33カット、(4)42から49カットである。また、図8が「Africa」の場合であり、同様に(1)9から11カット、(2)17から19カット、(3)21から23カット、(4)26から28カットとである。これらの図において、主観評価が3.5以下の場合に着目して、視差、動きベクトルとの関係を検討した。その結果、例えば、図7の(1)から(4)において、黒く斜を施した部分(約2s間)に対応して評価が低下していることがうかがわれる。この黒く斜を施した部分では、動き、もしくは、視差が大きく変化していると思受けられる。たとえば、(1)、(2)、(4)などである。同様に図8(b)においても、同じ傾向が、(2),(3),(4)に見受けられる。一方、図7の(4)の前半の部分、図8の(2)、(3)の前半の部分では、比較的、視差が大きく、動きの情報が少ないければ、評価が低いことはないということも、同時に見いだされる。

3.2 視覚疲労への視差、動きの影響

前述した実験の結果、解析を踏まえて、静止した立体画像を焦点深度の内と外に表示、さらに、焦点深度内で、立体画像を前後、左右に動かして表示し、視覚疲労の検討を行った¹¹⁾。立体画像表示に際しては、時分割立体HDTV(CRT表示)を用い、左右両画像間の歪み、特性の差異を少なくするように努めた。立体画像の表示では、日本語文章(小説)に視差を付け、図9に示すように、奥行きを0(表示画面)、 ± 0.82 , ± 1.36 , ± 1.9 degree (以下、deg.と略す)で表示し、また、図10に示すよう

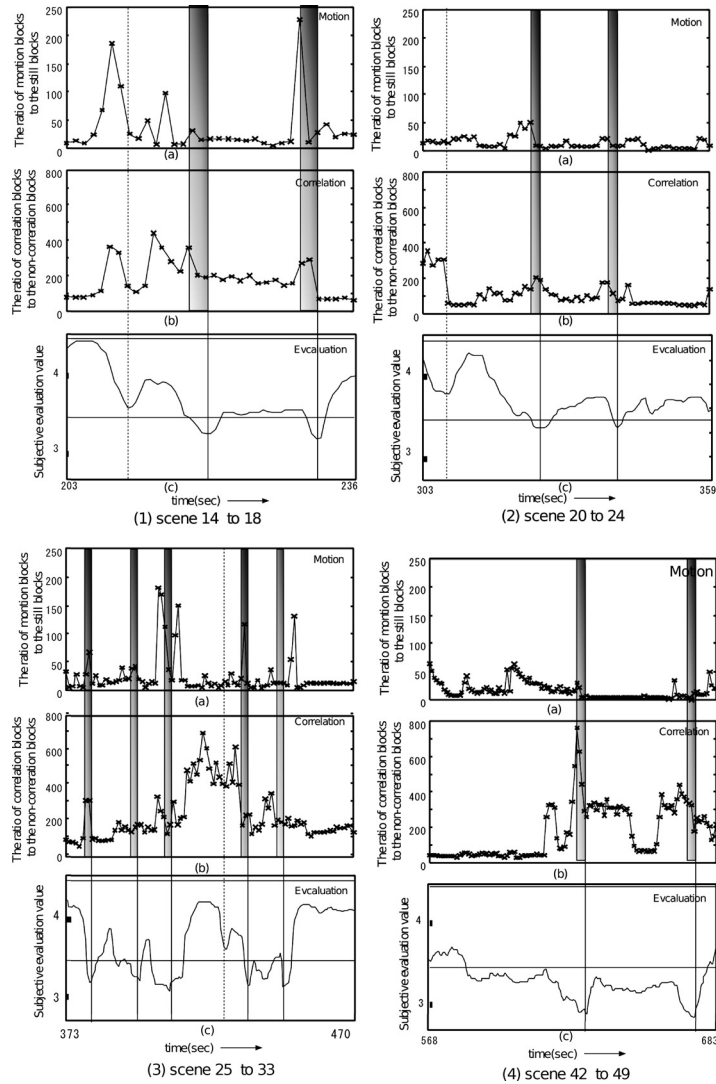


図7 立体HDTV「Waffen」での視差・動き・見やすさの評価の関係。

に、水平方向、および、奥行き方向に ± 0.4 、 $\pm 0.8 \text{ deg}$.の動きを与え、表示した。なお、動きの切り替えタイミングは、前述した立体HDTV「Waffen」のシーンチェンジを解析し、そのタイミングとした。この視標に関し、観視者はマウスでページ送りをしながら、読むとした。読み時間は、休憩をはさみながら約1時間程度である。

視覚疲労の有無は、立体/2次元HDTV画像の観視後で主観評価、および、観視前後での調節応答の振幅変動から推定した。主観評価実験

の結果を図11に示す。同図は、被験者6名の結果であり、左側が、立体画像を静止状態で表示した場合の結果を示しており、同図の右側が、横方向への動きと奥行き方向への動きの結果である。また、図12が、視標を観視前後での調節応答の振幅差を示している。静止、および、動き視標にして、同様な結果を示している。

図13は、主観評価結果である図11に統計的な処理を加えた結果である。この結果に基づくと立体画像が静止していれば、視差が、 $\pm 0.82 \text{ deg}$.では、平面画像の場合と有意さは認

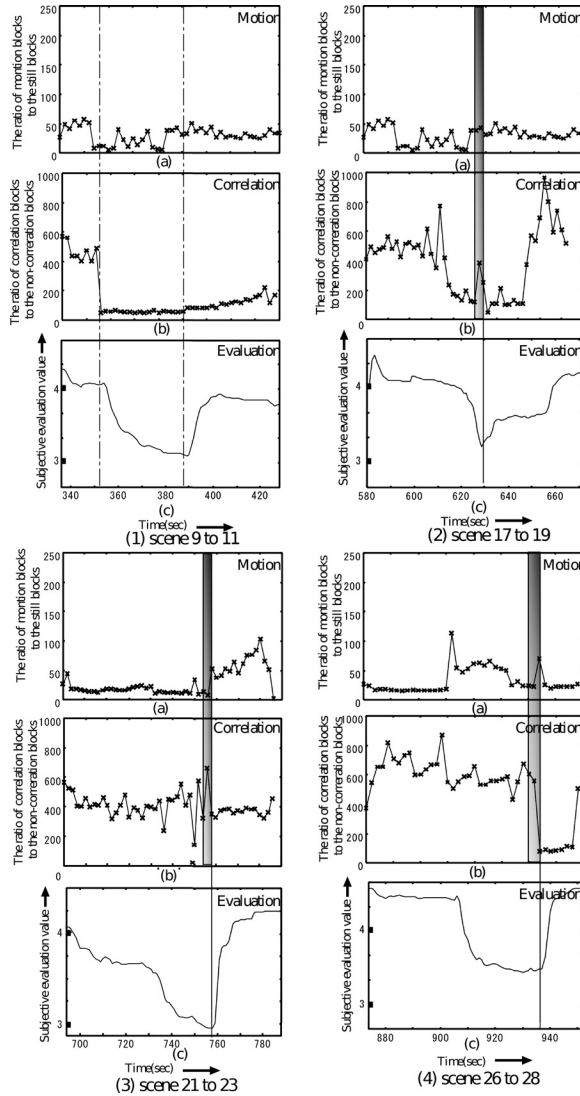


図8 立体HDTV「Africa」での視差・動き・見やすさの評価の関係。

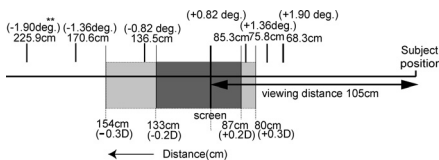


図9 立体静止視標の奥行き方向の表示位置。

められない。また、視覚疲労は、少なくとも ± 1.36 deg. より大きな視差では生じる可能性がある。ただし、スクリーンより前面では分散が大きく統計的有意さは、この視差では得られな

かった。したがって、両眼融合立体画像では、視覚疲労を避けるためには、焦点深度内の表示が望ましいと推測される。しかしながら、図11および図12に示す動き視標を考慮すると、視差0の水平方向の運動は影響がないと思われるが、奥行き方向の運動では、動き範囲が、たとえば焦点深度内でも、視覚疲労の要因となることが示されている。

これらの結果をまとめると、立体画像での視覚疲労を避けるには、焦点深度内での表示が望ましい。しかしながら、立体画像を焦点深度内

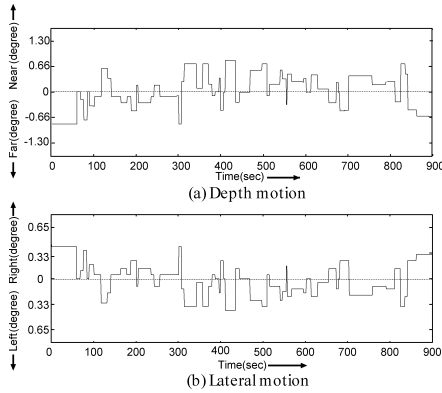


図 10 動き視標の視差・動き量と切り替えタイミング。

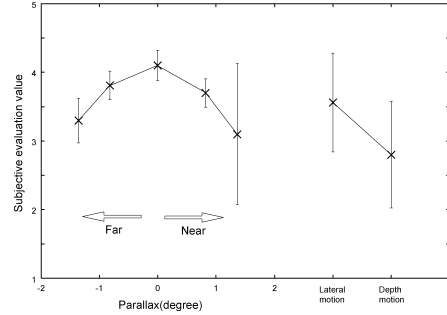


図 13 立体 HDTV での視覚疲労の評価と視差、動きの関係。

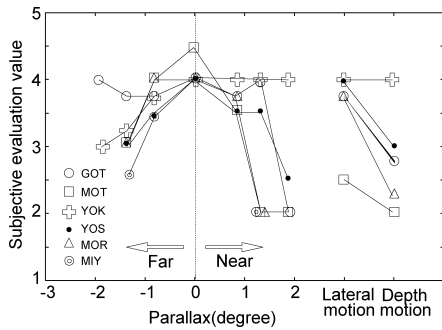


図 11 立体画像観視前後での視覚疲労の主観評価結果。

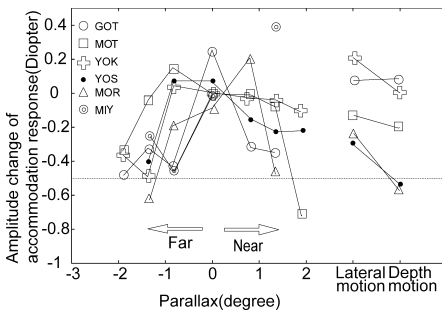


図 12 立体画像観視前後での調節応答の振幅の差。

に表示をおこなったとしても、急激な奥行き運動がある場合は視覚疲労の原因となると思われる。

4. おわりに

立体画像での視覚疲労の要因に関して、実験的に検討した結果を概説した。その結果、まず、立体画像を観視した場合、すべてのヒトではないが、視覚疲労を生じる可能性があることが示された。次に、立体画像を焦点深度内に表示すれば、視覚疲労が少なくと推測されるが、しかしながら、焦点深度内に表示した場合にも、奥行き方向に急峻な運動がある場合には視覚疲労の要因となる結果を得た。

これらの結果を踏まえると、立体画像による視覚疲労では、焦点深度に関して視距離、画面の明るさなどが、大きく寄与するために、これらのパラメータを考慮したさらなる検討が求められる。一方、動きに関しては、一つは、動きのどのようなコンポーネントが影響するのかは、今後、詳細な検討が必要である。また、動きの大きさ、頻度等の検討は、今回はなされては無く、同様に検討が必要であろう。このような点を踏まえて、輻輳・調節機能からみた視覚疲労が生じる仕組みを解明することにより、自然で眼にやさしく、魅力的に見ることができる立体画像表示が可能になるとと思われる。

文 献

- 1) 原島博監修：3次元画像と人間の科学。オーム社、2000。
- 2) 三橋哲雄 他：画像と視覚情報科学。コロナ

- 社, 2008.
- 3) I. M. Borish: *Clinical Refraction*. The Professional, Inc., 875-877, 1970.
 - 4) A. C. Percival: The Relation of convergence to accommodation and its practical bearing, *Ophthalmic Review*, **11**, 313-328, 1892.
 - 5) 渡部 勲: 眼球運動の制御機構. NHK 技術研究, **18**(2), 20-42, 1966.
 - 6) 比留間伸行, 福田忠彦: 調節応答から見た両眼融合式立体画像の観視条件. 電子情報通信学会論文誌 D, **J73-D2**(12), 2047-2054, 1990.
 - 7) 江本正喜, 矢野澄男: 立体画像観視に伴う融像幅の変化. 映像情報メディア学会誌, **54**(9), 1298-1304, 2000.
 - 8) 矢野澄男, 井出真司, H. Thwaites: 立体映像の見やすさと調節応答からみた視覚疲労. 映像情報メディア学会誌, **55**(5), 711-717, 2001.
 - 9) 矢野澄男, 井出真司, 奥井誠人: 立体画像の視差・動き量と見やすさとのかかわり. 映像情報メディア学会誌, **55**(5), 736-741, 2001.
 - 10) 江本正喜, 矢野澄男: 立体画像観視における両眼の輻湊と焦点調節の不一致と視覚疲労の関係. 映像情報メディア学会誌, **56**(3), 447-454, 2002.
 - 11) 矢野澄男, 江本正喜, 三橋哲雄: 両眼融合立体画像での二つの視覚疲労要因. 映像情報メディア学会誌, **57**(9), 133-139, 2003.